

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET PROMETNIH ZNANOSTI

Dorea Antolović

PRORAČUN UČINAKA REKATEGORIZACIJE  
AVIONA S OBZIROM NA VRTLOŽNI TRAG

ZAVRŠNI RAD

Zagreb, 2018.

Zagreb, 5. travnja 2018.

Zavod: **Zavod za aeronautiku**  
Predmet: **Zrakoplovna prijevozna sredstva**

## **ZAVRŠNI ZADATAK br. 4893**

Pristupnik: **Dorea Antolović (0135241210)**  
Studij: **Aeronautika**  
Smjer: **Kontrola leta**

Zadatak: **Proračun učinaka rekategorizacije aviona s obzirom na vrtložni trag**

### **Opis zadatka:**

Objasniti što je vrtložni trag zrakoplova i zašto nastaje. Opisati moguće posljedice na sigurnost odvijanja zračnog prometa uslijed vrtložnog traga.

Objasniti postojeću kategorizaciju zrakoplova s obzirom na vrtložni trag, te potrebu za rekategorizacijom. Navesti novu podjelu zrakoplova u kategorije vrtložnog traga.

Analizirati posljedice rekategorizacije zrakoplova na simuliranim podacima, izračunati moguće uštede vremena i prostora, odnosno povećanje broja operacija. Napraviti analizu rekategorizacije na temelju stvarnih podataka za odabrani aerodrom. Pri tome treba navesti i voditi računa o ostalim čimbenicima kao što su red letenja, kašnjenja, zahtjevi kontrole letenja itd.

Predložiti algoritam za optimizaciju redoslijeda operacija.

Izvesti zaključke.

Mentor:

Predsjednik povjerenstva za  
završni ispit:

---

mr. sc. Davor Franjković, v. pred.

Sveučilište u Zagrebu  
Fakultet prometnih znanosti

## **ZAVRŠNI RAD**

### **PRORAČUN UČINAKA REKATEGORIZACIJE AVIONA S OBZIROM NA VRTLOŽNI TRAG**

### **CALCULATION OF AIRPLANE WAKE TURBU- LENCE RECATEGORISATION EFFECTS**

Mentor: mr.sc. Davor Franjković

Student: Dorea Antolović  
JMBAG: 0135241210

Zagreb, 2018

## Sažetak

Svi zrakoplovi generiraju vrtložni trag koji znatno utječe na sigurnost i odvijanje operacija leta drugih zrakoplova koji mogu uletjeti u njega. Kako bi se smanjio rizik od nezgoda i nesreća uzrokovanih vrtložnim tragom, zrakoplovi se dijele u kategorije s obzirom na snagu vrtložnog traga koji mogu generirati i razdvajaju se ovisno o kategoriji kojoj pripadaju. Sigurnost se smatra prioritetom u zrakoplovstvu, no mnogi se drugi čimbenici uzimaju u obzir pri planiranju i provedbi zračnog prometa. Primjerice, efikasnost odvijanja operacija, kapacitet zračnog prostora i aerodroma te ekonomičnost postavljaju moraju se uzeti u obzir. Kako bi se ti čimbenici poboljšali bez ugroze razine sigurnosti, predložena je nova kategorizacija zrakoplova koja ih dijeli u više skupina i smanjuje obavezu normu razdvajanja u nekim slučajevima. U ovom radu analizirani su mogući utjecaji rekategorizacije na kapacitet. Korišteni su podaci o prometu s aerodroma na kojima je uvedena rekategorizacija te nasumično određeni podaci koji opisuju simulirani aerodrom.

KLJUČNE RIJEČI: vrtložni trag, kategorizacija, kapacitet, norma razdvajanja, učinkovitost

## SUMMARY

All aircraft generate wake turbulence that significantly affects the flight operations and safety of following airplanes that might fly into it. In order to reduce the risk of wake turbulence-related incidents and accidents, airplanes are divided into categories with regard to the strength of the vortices they can generate and are separated depending on the category they belong to. Safety is a priority in aviation, but there are other factors that are being taken into consideration both in planning and execution of flight operations. For instance, efficiency in flight operations, airspace and airport capacity and cost-effectiveness are also factors that are to be considered. In order to optimise those factors without jeopardising the level of safety, a new aircraft categorisation has been proposed that divides them into more groups and reduces mandatory standard separation in some cases. This paper analyzes possible impacts of re-categorisation. The data being used is traffic information from the airports where re-categorisation has been introduced, as well as randomly generated figures for a simulated airport.

KEYWORDS: wake turbulence, categorization, capacity, separation norm, effectiveness

# Sadržaj

1. Uvod .....	1
2. Vrtložni trag zrakoplova .....	3
2.1. Nastajanje vrtložnog traga .....	3
2.2. Učinci vrtložnog traga na prateći zrakoplov .....	6
3. Klasifikacija zrakoplova po vrtložnom tragu – ICAO .....	8
3.1. Minimalne norme udaljenosti zrakoplova u prilazu .....	8
3.2. Minimalne vremenske norme razdvajanja .....	9
Zrakoplovi u prilazu .....	9
Zrakoplovi u polijetanju .....	9
4. Projekt rekategorizacije zrakoplova RECAT – EU .....	10
4.1. Osnove za rekategorizaciju .....	10
4.2. Nova podjela i norme razdvajanja .....	12
5. Analiza rekategorizacije na simuliranom aerodromu .....	14
5.1. Generiranje nasumičnog poretka uzlijetanja i slijetanja .....	14
5.2. Proračun uštede vremena i/ili prostora .....	18
6. Analiza rekategorizacije na primjerima stvarnih aerodroma .....	21
6.1. Paris Charles de Gaulle .....	21
6.2. Paris-Le Bourget .....	26
7. Procjena učinkovitosti .....	30
7.1. Postizanje optimalne učinkovitosti u sekvencioniranju .....	30
7.2. Utjecaj na sigurnost .....	31
8. Zaključak .....	32
Popis literature .....	33
Popis ilustracija .....	34
Popis tablica .....	35
Popis grafikona .....	36

# 1. Uvod

Sigurnost se smatra prioritetom u zrakoplovstvu, pa se zbog toga svi sudionici strogo drže pravila i smjernica donesenih u svrhu osiguravanja prihvatljive razine sigurnosti. S druge strane, trend razvoja zrakoplovstva u stalnom je porastu, te se aviokompanije i pružatelji usluge kontrole letenja susreću s problemom nedovoljnog kapaciteta i zagušenosti aerodroma, što generira kašnjenje, nezadovoljstvo putnika i povećanje troškova.

Vrtložni trag, odnosno vrtložna turbulencija, predstavlja jedan od ograničavajućih kriterija u letu i u kontroli zračne plovidbe. Ona određuje donju granicu udaljenosti između zrakoplova koja ne ugrožava sigurnost zrakoplova, posade i putnika. Nastaje kao prirodna posljedica stvaranja uzgona, što znači da se sama pojava ne može ukloniti niti znatno kontrolirati, nego se uzima u obzir pri određivanju razmaka između zrakoplova. Zrakoplovi se tradicionalno dijele u 3 kategorije s obzirom na svoju masu, odnosno snagu vrtložnog traga kojeg generiraju. Takva je podjela u vrijeme kad je donesena bila sigurna i djelotvorna, no s porastom broja različitih tipova zrakoplova dovodi do presigurnog razdvajanja, što ima negativni utjecaj na kapacitet i brzinu odvijanja operacija u zračnom prometu. Cilj rada je analitički doći do zaključka o učinkovitosti nove kategorizacije koja dijeli zrakoplove u više skupina uzimajući u obzir njihovu masu i raspon krila. Naslov završnog rada je Proračun učinka rekategorizacije aviona s obzirom na vrtložni trag. Rad je podijeljen u sedam cjelina:

1. Uvod
2. Vrtložni trag zrakoplova
3. Klasifikacija zrakoplova po vrtložnom tragu – ICAO
4. Projekt rekategorizacije zrakoplova RECAT – EU
5. Analiza rekategorizacije na simuliranom aerodromu
6. Analiza rekategorizacije na primjeru stvarnog aerodroma
7. Zaključak

U drugom poglavlju prikazan je i objašnjen način nastajanja vrtložne turbulencije te njezin utjecaj na nadolazeći zrakoplov.

Treće poglavlje pobliže predstavlja kategorizaciju i normu razdvajanja koju je donijela Međunarodna organizacija za civilno zrakoplovstvo (ICAO).

Razvoj tehnike u zrakoplovstvu donosi razvoj tehnologije i novih procedura. U četvrtom je poglavlju predstavljena potreba za rekategorizacijom zrakoplova s obzirom

na vrtložni trag i uvođenje novih normi razdvajanja. Prikazana je nova kategorizacija i rezultirajuća pravila razdvajanja zrakoplova u prilazu i polijetanju.

Generiranjem podataka o prometu na simuliranom aerodromu dan je uvid u potencijalnu uštedu prostora u prilaznim sekvencama. Analiza i proračun na zamišljeni aerodrom dani su u petom poglavlju.

Aerodromi Paris Charles de Gaulle i Paris Le Bourget prvi su implementirali RECAT-EU. Koristeći se podacima o prometu na tim aerodromima napravljen je izračun učinaka rekategorizacije u šestom poglavlju.

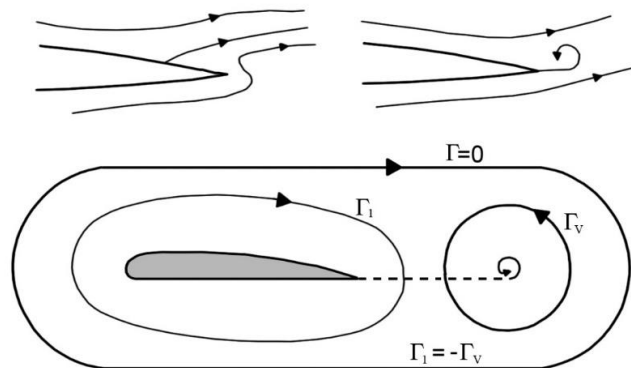
Sedmo poglavlje prikazuje način sekvencioniranja zrakoplova koji vodi do najboljeg iskorištenja rekategorizacije. Također je analiziran i utjecaj uvođenja RECAT-EU na sigurnost operacija na aerodromu.

## 2. Vrtložni trag zrakoplova

### 2.1. Nastajanje vrtložnog traga

Vrtlozi su prirodna posljedica nastajanja uzgona na krilima zrakoplova. Svaki zrakoplov generira vrtložni trag, čija postojanost i intenzitet ovise o težini zrakoplova, obliku i rasponu krila, letnoj brzini i lokalnim atmosferskim uvjetima [1]. Kad se zrakoplov kreće kroz zrak, na njegovim krilima dolazi do opstrujavanja. Strujanje zraka oko krila uzrokuje odgovarajuću raspodjelu tlakova ispod i iznad krila. Čestice zraka se na području prednjeg brida razdvajaju u dvije struje, jedna prelazi preko gornjake krila, druga ispod donjake. S gornje strane čestice zraka imaju veću brzinu nego s donje strane. Bernoullijev princip implicira da će tlak na gornjoj površini krila biti niži od tlaka ispod krila. Na račun te razlike stvara se sila uzgona.

Njemački matematičar Martin Wilhelm Kutta empirijski je došao do zaključka o veličini cirkulacije oko aeroprofila. Prije uspostave strujanja oko aeroprofila, fluid se nalazi u stanju mirovanja. U tom slučaju vrijednost cirkulacije jednaka je nuli. Nakon nastajanja strujanja, gibanje je nevirtložno zbog nedostatka cirkulacije te se na izlaznom bridu formira povratno strujanje od donjake prema gornjaci. Zbog duljeg puta, zrak koji struji preko gornjake kasnije dolazi na izlazni brid. Taj diskontinuitet na izlaznom bridu započinje tzv. „startni vrtlog“. Smjer okretanja startnog vrtloga suprotan je kazaljci na satu. Novopridošli fluid odnosi startni vrtlog nizstrujno. Prema Kelvinovom teoremu, ukupna vrijednost cirkulacije po zatvorenoj putanji sačinjenoj od istih čestica fluida ostaje konstantna. Da ukupna vrijednost cirkulacije ostane nepromijenjena i jednaka nuli, preostala masa zraka se oko aeroprofila počinje okretati u smjeru kazaljke na satu. Dakle, oko aeroprofila se uspostavlja strujanje s cirkulacijom. Cirkulacija ubrzava gibanje zraka nad krilom, a usporava ga ispod krila, što rezultira izjednačavanjem brzine fluida s gornjake i donjake na izlaznom bridu i omogućuje da fluid kontinuirano napušta aeroprofil bez daljnjih otkidanja vrtloga.



Slika 1. Nastajanje cirkulacije oko aeroprofila

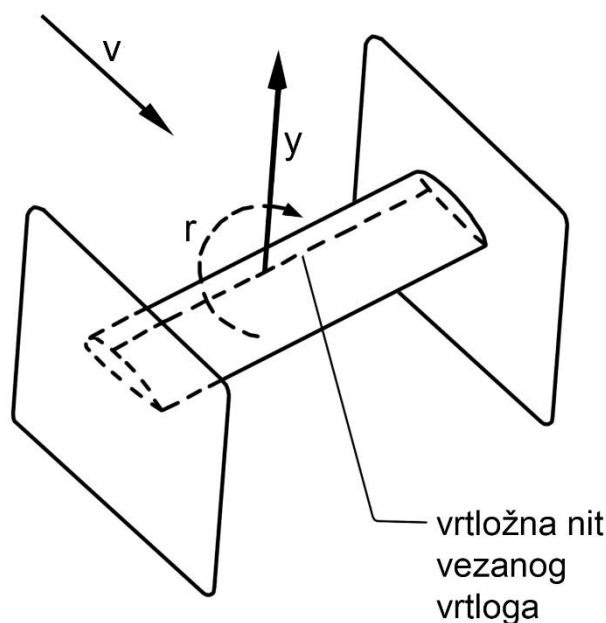


Kutta, koji je na ovaj način definirao veličinu cirkulacije, nije joj dao šire fizikalno značenje. Ruski znanstvenik Nikolaj Jegorovič Žukovski prvi je postavio teorem o veličini sile uzgona povezujući je s veličinom cirkulacije prema relaciji

$$F_a = \rho V \Gamma$$

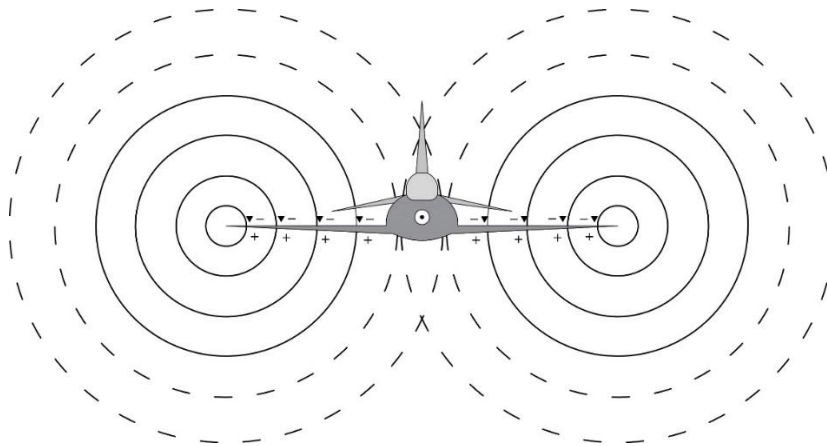
gdje je  $\rho$  gustoća fluida,  $V$  brzina fluida te  $\Gamma$  vrijednost cirkulacije oko tijela koju je eksperimentalnim putem odredio Kutta, pa se teorem o postanku sile uzgona koja je okomita na pravac brzine danas naziva teorem Kutta-Žukovski.

Kao što je dokazano, postojanje uzgona oko nekog tijela direktno je vezano uz pojam strujanja s cirkulacijom. Pri strujanju zraka oko aeroprofila dolazi do cirkulacije baš zato što zrak nije idealan fluid i ima određenu viskoznost koja pri strujanju stvara cirkulaciju. Prema tome, vrtlog koji predstavlja cirkulaciju oko aeroprofila vezan je uz samo fizikalno postojanje aeroprofila. Za razliku od potencijalnog vrtloga, koji je vezan uz jedne te iste čestice, vrtlog koji predstavlja cirkulaciju vezan je uz koordinate u prostoru, odnosno uz krilo. Za potrebe određivanja rezultirajuće sile uzgona, krilo beskonačnog raspona može se zamijeniti vezanim vrtlogom. Na taj način vezani vrtlog određene vrijednosti cirkulacije ekvivalentan je krilu beskonačnog raspona u pravocrtном strujanju s cirkulacijom. [2]



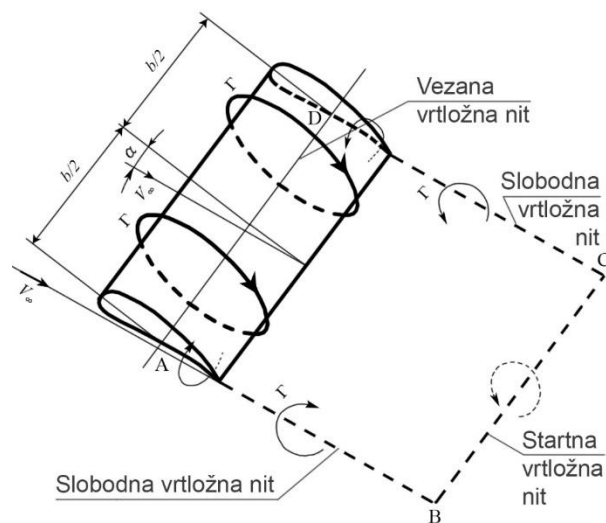
*Slika 2. Vezani vrtlog*

Strujanje oko krila konačnog raspona ima bitnu razliku u odnosu na strujanje oko krila beskonačnog raspona, a to je da strujanje dobiva treću dimenziju zbog utjecaja krajeva krila. Sila uzgona koja je proporcionalna cirkulaciji posljedica je razlike tlakova ispod i iznad krila. Nadtlak na donjaci nastoji se izjednačiti s podtlakom na gornjaci, rezultirajući prestrujavanjem na vrhovima krila te stvaranjem “slobodnih ili vrsnih” vrtloga.



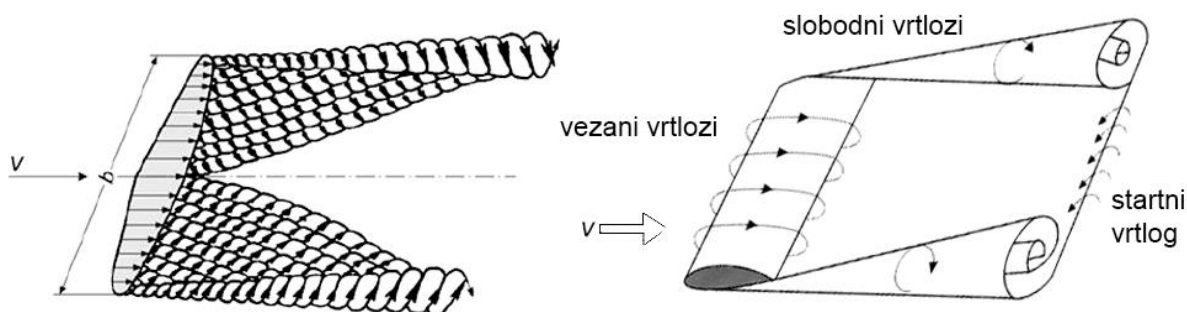
*Slika 3. Prestrujavanje na vrhovima krila*

Ovakvo se strujanje ne može prikazati pomoću jedne vrtložne niti koja se proteže kroz beskonačan raspon krila, zato što je raspon na realnom krilu konačan. Umjesto toga, sustav cirkulacije oko krila konačnog raspona opisan je vrtložnom niti u obliku potkove. Ona je svojim slobodnim dijelom vezana za krilo, a njeni krakovi se slobodno protežu u beskonačnost. Ti vrtlozi ponašaju se u skladu s Helmholtzovim teoremima koji ne dopuštaju da vrtlog nestane u fluidu na vrhovima krila. Budući da ne može nestati, vrtložna nit mora napraviti petlju ili se produžiti do beskonačnosti. Nadolazeći fluid zahvatit će vrtlog i ponijeti ga u smjeru strujanja prema beskonačnosti. Na taj se način formiraju dvije slobodne vrtložne niti koje zajedno s vezanom niti i startnom vrtložnom niti koja je formirana na početku gibanja čine zatvorenu petlju.



*Slika 4. Zatvorena vrtložna petlja, [3]*

Razlika tlakova koja uzrokuje prestrujavanje fluida s donje strane prema gornjoj također uzrokuje i pojavu komponente brzine duž raspona krila. Dolazi do savijanja struje prema ravnini simetrije na gornjaci i od ravnine simetrije na donjaci krila. Smanjuje se razlika srednjih vrijednosti tlakova na gornjaci i donjaci idući od osi simetrije krila prema vrhovima, pa se prema tome smanjuje i sila uzgona te intenzitet cirkulacije idući prema vrhovima krila. Svako promjeni cirkulacije odgovara jedno vrtložno vlakno s beskonačno malom cirkulacijom, koje se odvaja od krila u pravcu strujanja. Na taj se način umjesto dva slobodna vrtloga dobiva vrtložna površina iza izlaznog brida krila koja se proteže u beskonačnost, a sastoji se od sustava potkovičastih vrtloga.



*Slika 5. Formiranje vrtložne površine od izlaznog brida do beskonačnosti, [3]*

Takva vrtložna površina predstavlja površinu diskontinuiteta u brzini. Na izlaznom bridu susreću se struje s gornjake i donjake koje imaju isti iznos brzine, ali različitu usmjerenost. To se može postići samo ako se na izlaznom bridu duž raspona kontinuirano formiraju vrtlozi i otkidaju se nošeni nizstrujno. Formirana vrtložna površina nije stabilna te dolazi do koncentriranja vrtložnog gibanja u pravcima vršnih vrtloga krila, odnosno vrtložnog traga zrakoplova.

## 2.2. Učinci vrtložnog traga na prateći zrakoplov

Vrtložni trag predstavlja opasnost za zrakoplov koji u njega uleti, posebno u fazama polijetanja, inicijalnog penjanja, prilaza i slijetanja. Tri osnovna učinka vrtložnog traga na zrakoplov su inducirano valjanje (*induced roll*), gubitak visine ili brzine uzdizanja te moguće strukturalno opterećenje [4]. Velike vrijednosti destabilizirajućih sila i momenata koji djeluju na zrakoplov u aerodinamičkom tragu, čak i u njegovom kratkotrajnom letu kroz trag, dovode do promjena parametara leta. Opasnost se očituje u intenzivnosti djelovanja aerodinamičkog traga te u nemogućnosti pilota i zrakoplova da pariraju promjenama. Što je manja brzina zrakoplova u tragu, to je veće ugrožavanje sigurnosti letenja, a male brzine neizbježne su upravo u fazama prilaza i slijetanja. Let pri malim brzinama ujedno se odvija na povećanom napadnom kutu, što smanjuje rezervu do sloma uzgona. Pri tom režimu također je smanjena djelotvornost mehanizma upravljanja, pa za

pariranje destabilizirajućih momenata otkloni komandi mogu biti nedostatni. Ulijetanje u aerodinamički trag piloti doživljavaju kao trenutačni otkaz komandi leta. Kod naginjanja zrakoplova u tragu, dolazi do smanjenja vertikalne komponente sile uzgona te zbog toga zrakoplov gubi visinu. Zbog toga je ulijetanje u vrtložni trag najopasnije u polijetanju i slijetanju. [1]

### 3. Klasifikacija zrakoplova po vrtložnom tragu – ICAO

International Civil Aviation Agency (ICAO) u ICAO Doc 4444 PANS-ATM propisuje da se minimum razdvajanja zrakoplova po vrtložnoj turbulenciji temelji na grupiranju zrakoplova u tri kategorije prema najvećoj certificiranoj masi polijetanja kako slijedi:

- HEAVY (H) — svi zrakoplovi čija je masa pri polijetanju 136 000 kg ili veća;
- MEDIUM (M) — svi zrakoplovi čija je masa pri polijetanju manja od 136 000 kg, ali veća od 7000 kg;
- LIGHT (L) — svi zrakoplovi čija je masa pri polijetanju 7000 kg ili manja. [5]

Određivanje udaljenosti između dva zrakoplova pri dolasku ili odlasku koristi se kada se primjenjuje radarsko razdvajanje prometa, a vrijeme između uzastopnog prolaska dva zrakoplova nad nekom točkom koristi se kada se primjenjuje proceduralno razdvajanje. Praktični učinak ove razlike na IFR promet je taj da se za zrakoplove u dolasku koristi razdvajanje po udaljenosti, a zrakoplovi u polijetanju se razdvajaju po vremenskom intervalu, budući da rijetko koji aerodromi koriste radare pri razdvajanju zrakoplova u polijetanju i inicijalnom penjanju. [5]

#### 3.1. Minimalne norme udaljenosti zrakoplova u prilazu

Minimumi udaljenosti primjenjuju se kada:

- zrakoplov neposredno slijedi drugi zrakoplov na istoj visini ili do 1000 ft manjoj visini;
- oba zrakoplova koriste istu uzletno-sletnu stazu ili paralelne uzletno-sletne staze međusobno razdvojene manje od 760 m;
- jedan zrakoplov presijeca putanju drugog zrakoplova na istoj visini ili do 1000 ft manjoj visini. [6]

*Tablica 1. ICAO kategorizacija zrakoplova*

Vodeći zrakoplov	Prateći zrakoplov	Minimalna udaljenost
HEAVY	HEAVY	4.0 NM
HEAVY	MEDIUM	5.0 NM
HEAVY	LIGHT	6.0 NM
MEDIUM	LIGHT	5.0 NM

Izvor: [6]

### 3.2. Minimalne vremenske norme razdvajanja

#### *Zrakoplovi u prilazu*

Za razdvajanje po vremenu prilaza, predlaže se sljedeća norma razdvajanja za zrakoplove koji slijeću nakon HEAVY ili MEDIUM zrakoplova:

- a) MEDIUM zrakoplov iza HEAVY zrakoplova - 2 minute;
- b) LIGHT zrakoplov iza HEAVY ili MEDIUM zrakoplova - 3 minute.

#### *Zrakoplovi u polijetanju*

Norma razdvajanja od minimalno dvije minute trebala bi se koristiti za LIGHT ili MEDIUM zrakoplove koji polijeću nakon HEAVY zrakoplova ili za LIGHT zrakoplove koji polijeću nakon MEDIUM zrakoplova, a koriste:

- istu uzletno-sletnu stazu;
- paralelne uzletno-sletne staze čiji je međusobni razmak manji od 760 m;
- uzletno-sletne staze koje se križaju ako će projekcija puta drugog zrakoplova presjeći projekciju puta prvog zrakoplova na istoj visini ili na manje od 300 m (1000 ft) ispod;
- paralelne uzletno-sletne staze čiji je međusobni razmak veći od 760 m, ako će projekcija puta drugog zrakoplova presjeći projekciju puta prvog zrakoplova na istoj visini ili na manje od 300 m (1000 ft) ispod.

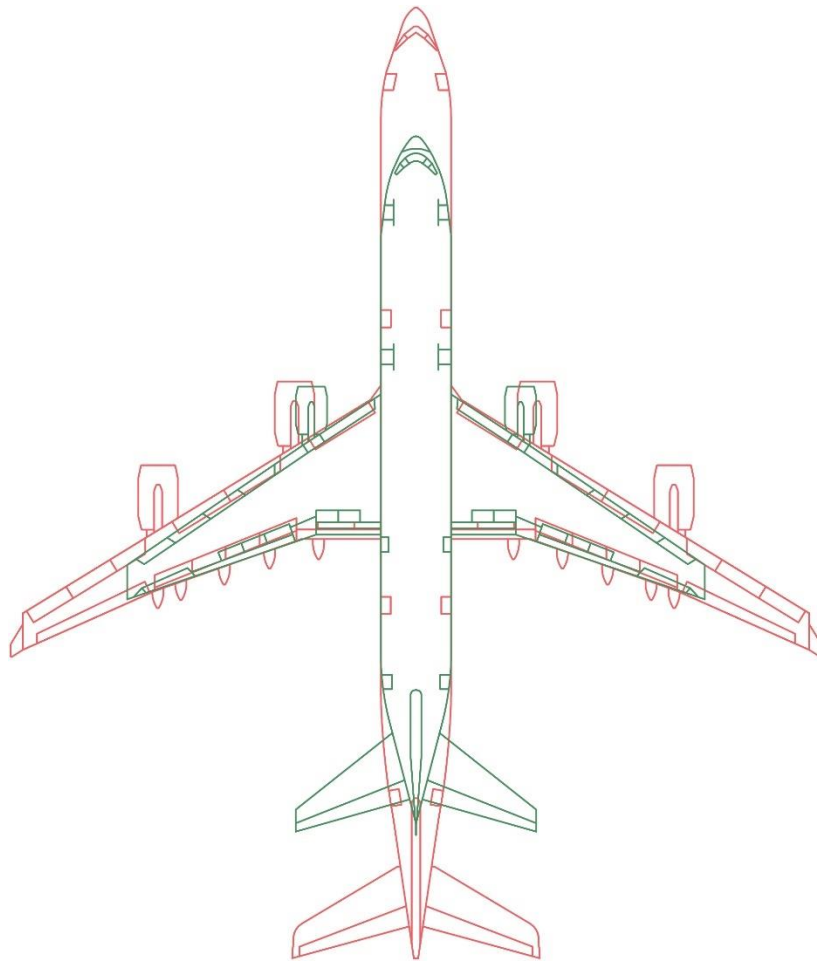
Minimum norme razdvajanja od 3 minute trebao bi se koristiti između LIGHT i MEDIUM zrakoplova kada polijeću nakon HEAVY zrakoplova ili između LIGHT zrakoplova koji polijeće nakon MEDIUM zrakoplova sa:

- a) središnjeg dijela iste uzletno-sletne staze (*intermediate part*);
- b) središnjeg dijela paralelne uzletno-sletne staze koja je manje od 760 m razmaknuta. [5]

## 4. Projekt rekategorizacije zrakoplova RECAT – EU

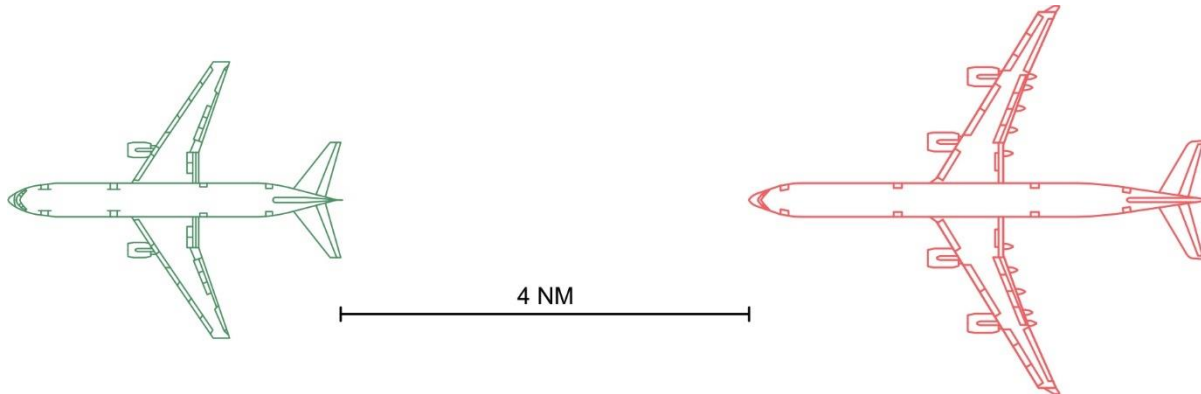
### 4.1. Osnove za rekategorizaciju

Veliki su zahtjevi za povećanjem kapaciteta i djelotvornosti na mnogim europskim aerodromima, a posebno za poboljšanjem protočnosti uzletno-sletnih staza. Kapacitet i djelotvornost staze često je direktno vezana uz minimalnu separaciju zrakoplova. Ti minimumi određeni su sposobnošću nadzornih sustava i aerodinamičkom turbulencijom. Postojeća pravila ICAO-a za razdvajanje zrakoplova s obzirom na vrtložni trag implementirana su prije više od 40 godina. U nekim su pogledima zastarjela s obzirom na znatan porast prometa od vremena kad su donesena, te u mnogim situacijama vode do prevelike separacije. Svaka kategorija kategorizacije ICAO-a uključuje veliki broj različitih zrakoplova, što u nekim slučajevima vodi do previše konzervativne separacije i smanjenja kapaciteta uzletno-sletne staze.

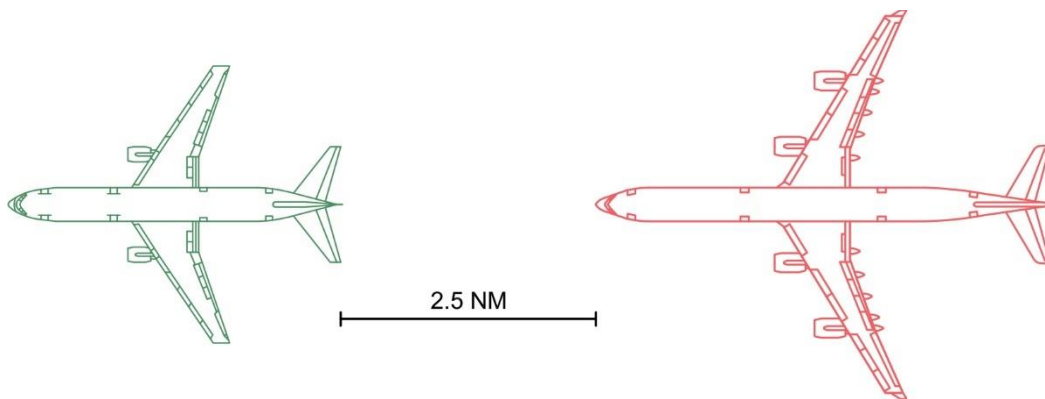


Slika 6. HEAVY kategorija - BOEING 767-300 (zeleni) i AIRBUS A340-600 (crveni), [7]

Na primjeru zrakoplova BOEING 767-300 i AIRBUS A340-600 vidljivo je da, iako su oba zrakoplova u HEAVY kategoriji, postoji znatna razlika u veličini te više od 15 metara razlike u rasponu krila. Prema tome, u slučaju kad A346 prati B767, dolazi do prevelike separacije.



*Slika 7. Prekonzervativna separacija B763 -A346, [7]*



*Slika 8. Smanjena separacija B763 - A346, [7]*

Smanjenje sigurne minimalne udaljenosti između određenog para zrakoplova znači da ne treba uzeti u obzir samo vrtložni trag vodećeg zrakoplova, već i sposobnost pratećeg zrakoplova da mu se odupre, pri polijetanju ili prilazu na slijetanje.

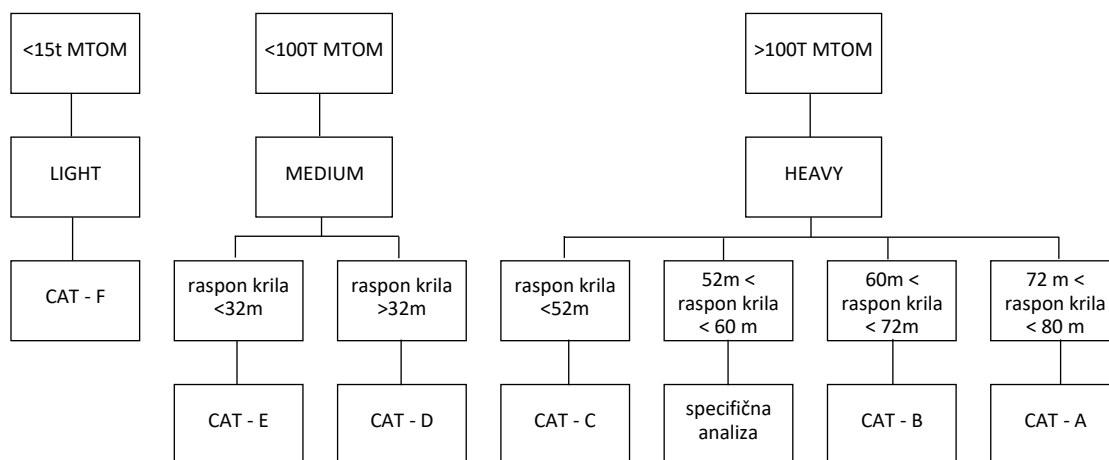
Projekt *European Wake Vortex Re-categorisation* (RECAT-EU) novi je, mnogo precizniji način kategorizacije zrakoplova od tradicionalnog ICAO-vog. Cilj mu je sigurno povećati kapacitet zračnih luka redefiniranjem kategorija zrakoplova s obzirom na vrtložni trag i minimalne norme razdvajanja u prilazu i polijetanju koje se uz njih vežu. [8]



## 4.2. Nova podjela i norme razdvajanja

Uvođenje zrakoplova AIRBUS A380 u zračni promet označilo je prekretnicu u pristupu separaciji s obzirom na vrtložni trag. Odredbe ICAO-a podvrgnute su reviziji, budući da je A380 preuzeo mjesto najvećeg putničkog zrakoplova, stvarajući vrtložni trag veći od najvećeg zrakoplova u HEAVY kategoriji. Osnovana je ekspertna skupina s predstavnicima iz EUROCONTROL-a, EASA-e, AIRBUS-a, FAA i ICAO-a kako bi procijenili vrtložni trag AIRBUS-a A380 i utvrdili nove preporuke ICAO-a za separaciju. Nakon uvođenja odredbi ICAO-a za minimume razdvajanja između A380 i pratećeg prometa, istraživanje je prošireno kako bi se ustvrdilo je li moguća globalna revizija razdvajanja prema aerodinamičkoj turbulenciji. Dogovoreno je da će se rad na A380 uključiti u širi program rekategorizacije za Europu („RECAT-EU“) te da će se testovi na A380 koristiti kao ključni elementi u validaciji normi predloženih u RECAT-EU. [5]

Kategorizacija RECAT-EU temelji se na uspoređivanju svojstava stvaranja turbulencije i otpornosti na turbulenciju između parova zrakoplova. Promatrajući ta svojstva na zrakoplovima unutar iste ICAO kategorije (H, M, L), došlo se do zaključka da su razlike na suprotnim krajevima kategorija znatne, te se ICAO HEAVY i MEDIUM kategorija mogu razdvojiti svaka u još dvije kategorije, „Upper“ i „Lower“.



Slika 9. RECAT - EU kategorizacija zrakoplova; izvor: [8]

Takva podjela dopušta smanjenje minimuma separacije za određene parove zrakoplova, omogućujući povećanje protočnosti uzletno-sletne staze, dok istovremeno održava razinu sigurnosti prihvatljivom. Određene prednosti u vidu sigurnosti omogućene su za neke manje tipove zrakoplova povećanjem njihove minimalne separacije i/ili promjenom kategorije, čime se smanjuje rizik od nezgoda izazvanih turbulencijom.

*Tablica 2. RECAT - EU minimalna norma razdvajanja prema udaljenosti za prilaz i polijetanje*

RECAT – EU shema razdvajanja		SUPER HEAVY	UPPER HEAVY	LOWER HEAVY	UPPER MEDIUM	LOWER MEDIUM	LIGHT
Vodeći/ prateći		CAT - A	CAT - B	CAT - C	CAT - D	CAT - E	CAT – F
SUPER HEAVY	CAT - A	3 NM	4 NM	5 NM	5 NM	6 NM	8 NM
UPPER HEAVY	CAT - B		3 NM	4 NM	4 NM	5 NM	7 NM
LOWER HEAVY	CAT - C		()	3 NM	3 NM	4 NM	6 NM
UPPER MEDIUM	CAT - D						5 NM
LOWER MEDIUM	CAT - E						4 NM
LIGHT	CAT - F						3 NM

Izvor: [8]

*Tablica 3. RECAT - EU minimalna norma razdvajanja prema vremenu za polijetanje*

RECAT – EU shema razdvajanja		SUPER HEAVY	UPPER HEAVY	LOWER HEAVY	UPPER MEDIUM	LOWER MEDIUM	LIGHT
Vodeći/ prateći		CAT - A	CAT - B	CAT - C	CAT - D	CAT - E	CAT – F
SUPER HEAVY	CAT - A		100 s	120 s	140 s	160 s	180 s
UPPER HEAVY	CAT - B				100 s	120 s	140 s
LOWER HEAVY	CAT - C				80 s	100 s	120 s
UPPER MEDIUM	CAT - D						120 s
LOWER MEDIUM	CAT - E						100 s
LIGHT	CAT - F						80 s

Izvor: [8]

## 5. Analiza rekategorizacije na simuliranom aerodromu

### 5.1. Generiranje nasumičnog poretka uzlijetanja i slijetanja

RECAT-EU predlaže nov način podjele zrakoplova i odgovarajuću minimalnu normu separacije. Međutim, ta norma donosi promjene samo u odnosima između određenih novonastalih kategorija. Ako uzmemo za primjer dva zrakoplova D kategorije, koji po podjeli ICAO-a spadaju u kategoriju Medium, ne dolazi do razlike u razdvajanju. S druge strane, ako je zrakoplov kategorije D sljedeći u redu za slijetanje nakon zrakoplova kategorije B, njihova se međusobna udaljenost mijenja, jer u tom slučaju separacijska norma iznosi 4 nautičke milje, dok ih ICAO kategorizira kao Medium zrakoplov koji prati Heavy, i nalaže 5 nautičkih milja udaljenosti. Iz toga proizlazi zaključak da udio određenih kategorija u cjelokupnom prometu na promatranom aerodromu ima utjecaj na učinkovitost rekategorizacije. Za potrebe analize učinaka rekategorizacije na nekom zamišljenom aerodromu, promatra se promet sastavljen od nasumično izabranih zrakoplova navedenih u Tablici 4.

*Tablica 4. Ukupan promet simuliranog aerodroma*

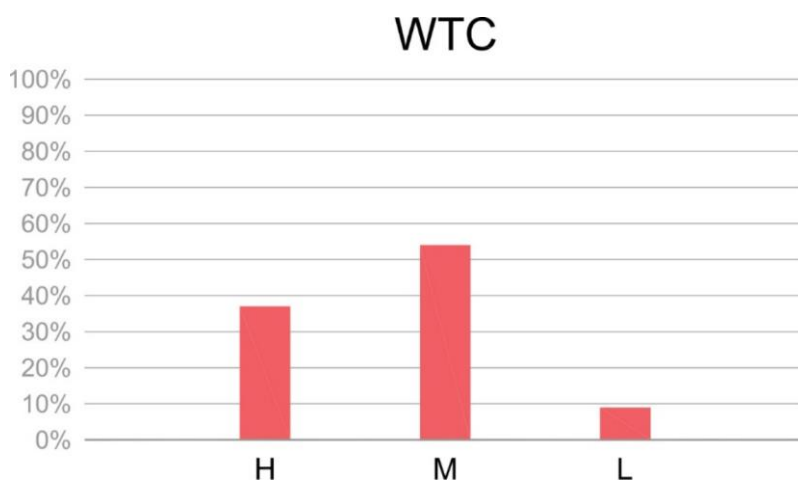
TIP AVIONA	BROJ AVIONA	WTC KATEGORIJA	RECAT-EU KATEGORIJA
A380	16	H	A
A343	45	H	B
A333	34	H	B
B772	48	H	B
B763	13	H	C
B764	35	H	C
B744	17	H	C
A332	32	H	C
A319	30	M	D
A321	15	M	D
B737	18	M	D
B739	64	M	D
A320	49	M	D
F70	18	M	E

DH8D	51	M	E
B735	28	M	E
B734	31	M	E
C550	21	L	F
C35A	36	L	F
P180	14	L	F

Koristeći bazu podataka EUROCONTROL-a, izabrani zrakoplovi podijeljeni su u skupine ovisno o pripadnosti WTC i RECAT-EU kategorizaciji. Za potrebe analize eventualne uštede prostora i povećanja kapaciteta aerodroma korišten je uzorak od 35 zrakoplova, s tim da su podijeljeni u kategorije tako da se održi isti postotak kao u podatku o ukupnom poretku. Kao što je vidljivo iz tablice 5 i grafikona 1, na promatranom simuliranom aerodromu najveći udio ima promet karakteristika koje ga uvrštavaju u kategoriju Medium ICAO podjele, no Heavy zrakoplovi također su zastupljeni u znatnom postotku, dok zrakoplova kategorije Light ima manje od 10%

*Tablica 5. Udio kategorija - ICAO*

WTC	BROJ	UDIO
H	13	37.14%
M	19	54.29%
L	3	8.57%
Ukupno	35	100%



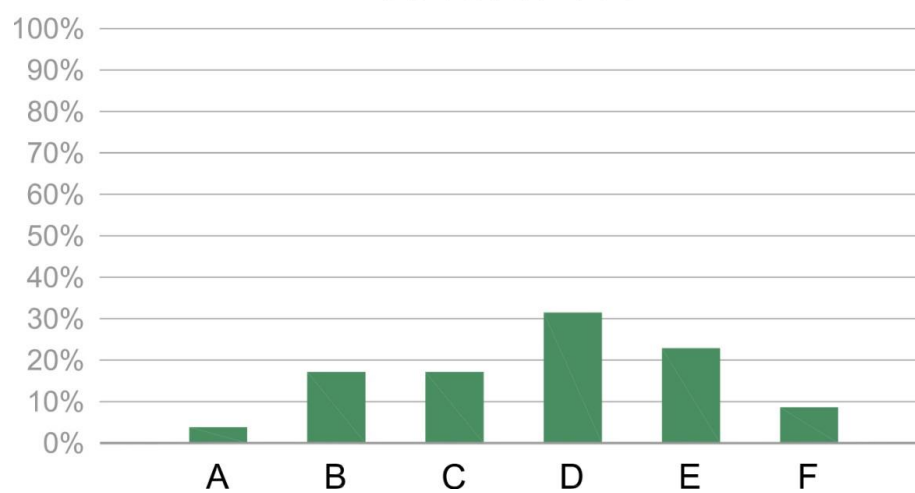
*Grafikon 1. Podjela zrakoplova u kategorije – WTC*

Podjelom istih zrakoplova koristeći RECAT-EU, dolazi se do podataka predstavljenih u tablici 6 i grafikonu 2. Kategorija Medium podijeljena je u D i E kategorije, s većim brojem zrakoplova u D kategoriji. Najmanji postotak zrakoplova pripada kategoriji A, dok je ostatak Heavy zrakoplova jednako raspoređen između B i C skupine. Broj Light zrakoplova odgovara kategoriji F, s jednakim postotkom u ukupnom broju.

*Tablica 6. Udio kategorija - RECAT-EU*

RECAT-EU	BROJ	UDIO
A	1	2.86%
B	6	17.14%
C	6	17.14%
D	11	31.48%
E	8	22.86%
F	3	8.57%
Ukupno	35	100%

## RECAT-EU



*Grafikon 2. Podjela zrakoplova u kategorije - RECAT-EU*

## 5.2. Proračun uštede vremena i/ili prostora

Nasumično odabrani avioni podijeljeni su u kategorije, što pruža podatak o udjelu pojedinih tipova aviona u ukupnom prometu zamišljenog aerodroma. Nakon što je izabran uzorak od 35 zrakoplova koji svojim karakteristikama predstavljaju WTC i RECAT-EU kategoriju u traženom postotku, oni mogu biti posloženi u prilaznu sekvencu. Na taj način može se usporediti koliko prostora zauzimaju s međusobnom udaljenošću koja odgovara minimalnoj normi koju propisuje ICAO, a koliko ako se razdvajaju prema zahtjevima RECAT-EU kategorizacije.

U ovom radu, ukupan analizirani broj od 35 aviona podijeljen je na 5 manjih sekvenci, od kojih svaka sadržava 7 aviona. Razlog tome je što prelazeći iz faze krstarenja u fazu prilaza, zrakoplovi smanjuju visinu i brzinu kako bi mogli doći u poziciju iz koje mogu sigurno sletjeti. Nije realno očekivati da cijeli niz od 35 zrakoplova istovremeno ili s vrlo malim međusobnim vremenskim razmakom započne sa smanjivanjem brzine i visine, prema tome, njih se može podijeliti u manje skupine da se omogući procjena zauzeća prostora u uvjetima gdje su parametri brzine i visine zrakoplova koji su analizirani približno isti.

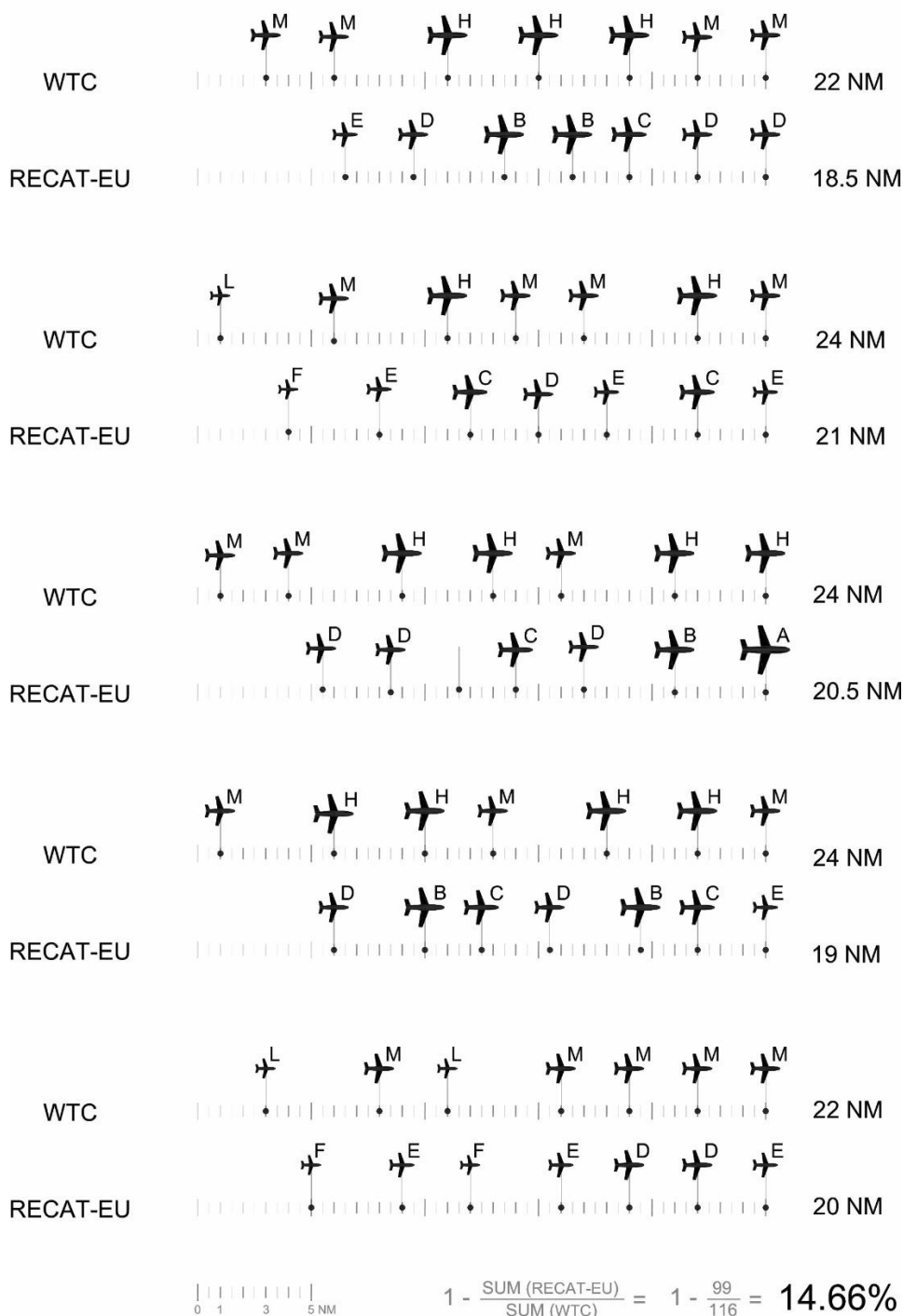
Postoji još razloga za podjelu zrakoplova u nekoliko kraćih nizova. Ukoliko se uzletno-sletna staza koristi za operacije slijetanja i polijetanja, zrakoplovi koji polijeću prekidaju sekvencu slijetanja zato što staza ni u jednom trenutku ne smije biti korištena od strane više od jednog zrakoplova. Smatra se da je staza zauzeta od trenutka kad zrakoplov koji slijeće dobije dozvolu za slijetanje do trenutka kad ju napusti, te od trenutka kad zrakoplov koji polijeće taksira na uzletno-sletnu stazu i priprema se za zatrčavanje, do trena kad je ili prošao kraj aktivne uzletno-sletne staze ili započeo skretanje od smjera pružanja uzletno-sletne staze.

Nepredviđene situacije kao što su nedozvoljen ulazak na aktivnu uzletno-sletnu stazu od strane vozila, životinja i ljudi ili kontaminacija staze nekim objektom također sprečavaju slijetanje, što prekida niz definiran minimalnom separacijom između zrakoplova. Meteorološke prilike kao što je smanjena vidljivost također mogu utjecati na niz zrakoplova u slijetanju, zato što pilot na visini odluke mora potvrditi vizualan kontakt sa stazom kako bi mogao sletjeti, u protivnom kreće u postupak ponovnog prilaženja.

U prilazu za slijetanje kontrola leta svojim uputama o smjeru leta i restrikcijama brzine održava zrakoplove na željenoj međusobnoj udaljenosti kako ne bi došlo do ugroze sigurnosti i smanjenja dozvoljene minimalne separacije. Tehnika razdvajanja ne razlikuje se ovisno o tome radi li se o normi udaljenosti koju donosi ICAO ili novoj RECAT-EU normi, pa minimalna brzina zrakoplova koja varira ovisno o tipu i masi zrakoplova u pitanju neće biti uzeta u obzir pri izračunu uštede prostora između nove i stare podjele zrakoplova.

Na slici 10 grafički je prikazana usporedba zadanih sekvenci zrakoplova. U svakoj sekvenci radi se o istim tipovima zrakoplova. Jedina razlika između gornjeg i donjeg retka je u pripadnosti odgovarajućoj kategoriji po WTC i RECAT-EU podjeli.

## SIMULIRANI AEODROM



Slika 10. Izračun uštede prostora na simuliranom aerodromu



U ovoj je metodi umjesto tipa svakog zrakoplova označen naziv kategorije kojoj zrakoplovi pripadaju, zato što je međusobna udaljenost aviona određena pripadnošću zrakoplova određenoj kategoriji. Na taj se način jedna odabrana sekvenca može koristiti za mnogo slučajeva s različitim tipovima zrakoplova. Primjerice, na mjestu koje je označeno kategorijom Medium WTC kategorizacije, odnosno kategorijom D RECAT-EU kategorizacije može se izmijeniti više tipova zrakoplova koji odgovaraju toj podjeli.

Zrakoplovi su u svakoj sekvenci, u oba slučaja, razdvojeni za vrijednost minimalne separacije s obzirom na vrtložni trag. Na kraju svakog niza napisano je koliki prostor zauzimaju zrakoplovi međusobno razdvojeni prema WTC i RECAT-EU pravilima razdvajanja. Vidljivo je da je u svakom nizu postignuta ušteda zauzetog prostora, što se može interpretirati kao mogućnost povećanja kapaciteta samog aerodroma. Na ovom primjeru veliku uštedu prostora donose zrakoplovi kategorije H, odnosno A, B i C, jer se u gotovo svakom slučaju za zrakoplov koji po ICAO-u spada u kategoriju Heavy smanjuje minimalna norma razdvajanja u odnosu na druge zrakoplove iste kategorije ili Medium kategorije, i obrnuto, kad se prijeđe na RECAT-EU način separacije.

Navedeni postotak označava moguću uštedu prostora za zadanih 35 zrakoplova koji predstavljaju ukupan promet na simuliranom aerodromu.

## 6. Analiza rekategorizacije na primjerima stvarnih aerodroma

RECAT-EU implementiran je na dva aerodroma u Parizu: Charles de Gaulle i Paris–Le Bourget. Charles de Gaulle najveći je međunarodni aerodrom u Francuskoj i drugi najveći u Europi po broju putnika, zrakoplovnih operacija i tereta. Paris-Le Bourget najstariji je od 4 aerodroma koji opslužuju Pariz. U današnje vrijeme koristi se uglavnom za operacije generalne avijacije, uključujući privatne zrakoplove. Vrste usluga koju ova dva promatrana aerodroma pružaju sasvim su drugačije i njima se koriste različiti korisnici, što uvjetuje i različitu sliku prometa. Unatoč tome, RECAT-EU uspješno je uveden na oba aerodroma, što znači da udio RECAT-EU kategorija u ukupnom broju zrakoplova nije jedini čimbenik koji utječe na uštedu prostora i poboljšanje kapaciteta.

Za potrebe proračuna učinaka rekategorizacije na primjeru stvarnih aerodroma, korišteni su podaci o prometu dobiveni iz programa NEST. NEST je alat za modeliranje koji se temelji na scenarijima koje koristi EUROCONTROL za projektiranje i razvoj strukture zračnog prostora, planiranje kapaciteta i provođenje analize poslije operacija, pripremu scenarija za podršku u realnim simulacijama itd. Izračun uštede prostora u prilazu napravljen je u oba primjera prema podacima o slijetanju na promatrane aerodrome na dan 30. 6. 2017. Na taj način dobiven je popis tipova zrakoplova koji su koristili te aerodrome u promatranom vremenu.

### 6.1. Paris Charles de Gaulle

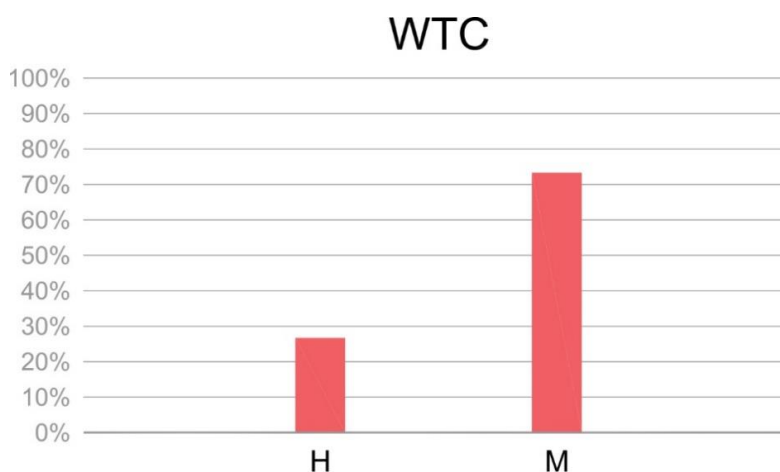
Za analizu prometa na aerodromu Paris Charles de Gaulle (ICAO kratica LFPG), koriste se podaci dobiveni iz NEST-a. U tablici 7 navedeni su tipovi zrakoplova koji su sletjeli na aerodrom dana 30. 6. 2017., broj slijetanja svakog tipa zrakoplova te njihova pripadnost ICAO i RECAT-EU podjelama. Ti su podaci obrađeni kako bi se dobio uvid u udio pojedinih kategorija u ukupnom prometu tog aerodroma na promatrani dan.

Broj različitih tipova zrakoplova znatno je veći nego na primjeru simuliranog aerodroma obrađenom u prethodnom poglavlju, no princip analize ostaje isti. Određen je udio pojedinih kategorija u ukupnom poretku te je odabrano 35 zrakoplova koji će predstavljati ukupni promet u tom danu. Nakon toga je određeno kojim kategorijama odabrani zrakoplovi pripadaju, sto omogućuje da prikazani primjer i analiza sekvencioniranja budu općenito primjenjivi na cjelokupni promet na aerodromu dana 30. 6. 2018.

Tablica 7. Podaci o prometu za LFPG 30. 6. 2017.

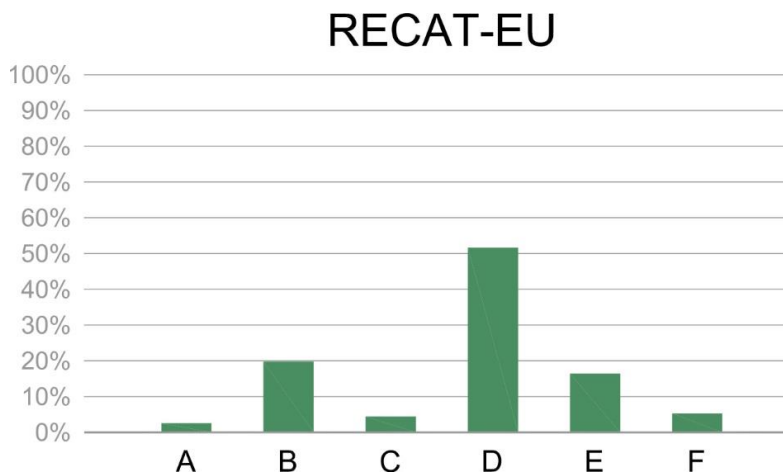
TIP	BROJ	WTC	RECAT-EU		TIP	BROJ	WTC	RECAT-EU
A306	8	H	C		B738	29	M	D
A318	56	M	D		B739	3	M	D
A319	115	M	D		B744	6	H	B
A320	140	M	D		B752	25	M	E
A321	62	M	D		B762	3	H	C
A332	32	H	B		B763	19	H	C
A333	13	H	B		B764	3	H	C
A342	3	H	B		B772	25	H	B
A343	12	H	B		B77L	9	H	B
A345	1	H	B		B77W	43	H	B
A346	2	H	B		B788	11	H	B
A388	20	H	A		CRJ9	4	M	E
AT43	7	M	E		DH8D	1	M	E
AT72	7	M	E		E120	1	M	F
B190	1	M	F		E135	1	M	E
B712	1	M	E		E145	4	M	E
B733	13	M	E		E170	40	M	F
B734	6	M	E		E190	35	M	E
B735	2	M	E		F100	2	M	E
B736	1	M	D		MD11	2	H	C
B737	4	M	D		RJ1H	1	M	E
					RJ85	21	M	E

Podaci o podjeli prema ICAO, odnosno WTC, prikazani su grafikonom 3. Na ovom aerodromu kategorija Medium sadrži daleko najveći broj zrakoplova, sa 74 % naspram 26 % zastupljenosti Heavy zrakoplova. Zrakoplovi kategorije Light uopće nisu zastupljeni na Charles de Gaulle aerodromu, što je razumljivo s obzirom na njegovu veličinu te broj operacija i prevezenih putnika i ulogu u prijevozu tereta na razini Francuske i Europe.



*Grafikon 3. Udio ICAO kategorija u ukupnom prometu za LFPG 30. 6. 2017.*

Grafikon 4 prikazuje podjelu zrakoplova sa Charles de Gaulle na svih pet RECAT-EU kategorija. Promjena u odnosu na WTC grafikon je postojanje F kategorije, koja obično korelira s Light kategorijom po ICAO podjeli. U nekim slučajevima, zrakoplovi koji su po ICAO-u kategorizirani kao Medium spadaju u najnižu, F kategoriju nakon rekategorizacije kako bi se smanjila njihova udaljenost od ostalih zrakoplova koji su veći od njih, a prethodno su bili svrstani u istu kategoriju. Na taj se način povećava sigurnost za zrakoplove kojima je to potrebno. Kategorija Medium dijeli se na još dvije, D i E, od kojih D ima otprilike 3 puta više aviona. U podjeli Heavy skupine na A, B i C dominiraju zrakoplovi kategorije B, dok su A i C zastupljeni s manje od 10%.



*Grafikon 4. Udio RECAT-EU kategorija u ukupnom prometu za LFPG 30. 06. 2017.*

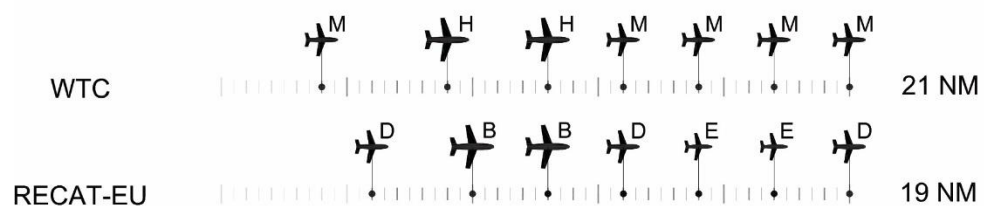
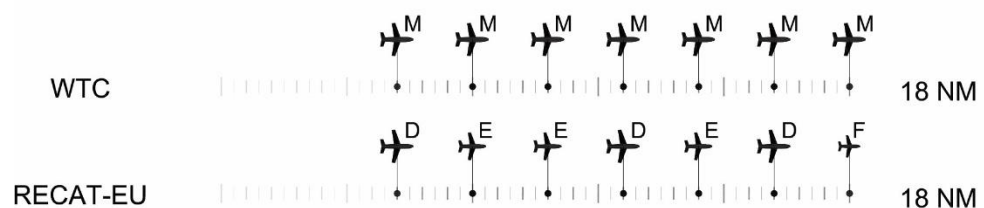
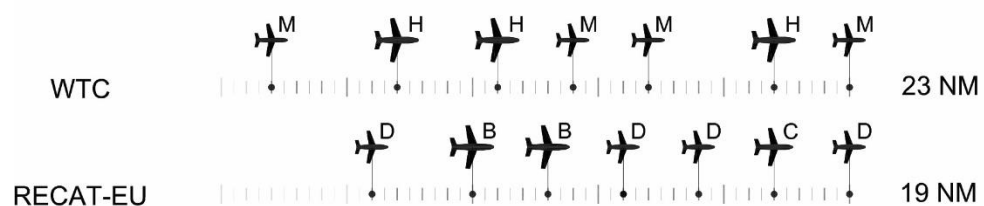
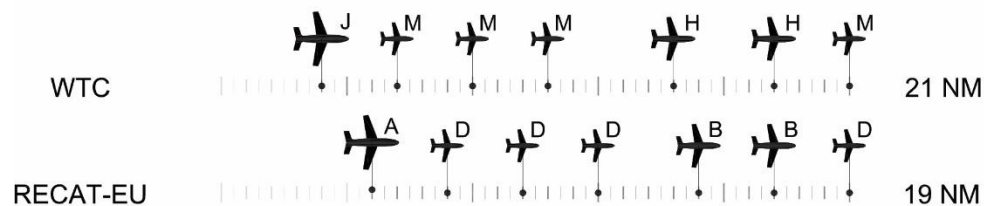
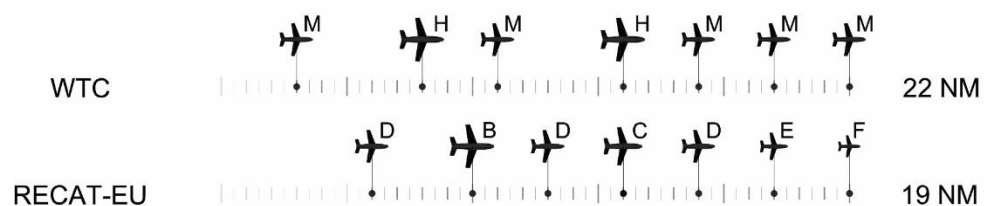
Na slici 11. prikazan je proračun moguće uštede prostora na aerodromu Paris Charles de Gaulle koristeći stvarne podatke o prometu. Zrakoplovi kategorija Upper Heavy, Lower Heavy i Upper Medium nositelji su uštede prostora jer upravo njihovi

međuodnosi zahtijevaju manju udaljenost nego što je to u slučaju Heavy i Medium kategorije. Kao što je vidljivo iz četvrte sekvence, zrakoplovi bivše kategorije Medium zadržavaju istu udaljenost kad ih se podjeli u Upper Medium i Lower Medium, a jedini utjecaj na skraćivanje sekvence prilaza imaju kad su sljedeći u redu iza Upper ili Lower Heavy zrakoplova. Postojanje najmanje kategorije u RECAT-EU podjeli nije negativno utjecalo na duljinu niza zato što su u ovom primjeru zrakoplovi kategorije F stavljani kao prvi u nizu, međutim, i da to nije slučaj, ukupni postotak uštede prostora, odnosno povećanja kapaciteta, ne bi se mnogo promijenio, a ti zrakoplovi bi bili bolje zaštićeni.

Razlog manjoj ukupnoj uštedi prostora u usporedbi sa simuliranim aerodromom je taj što je postotak kategorija Upper i Lower Heavy mnogo manji nego kod simuliranih podataka, a u oba su slučaja one imale najveći pozitivni učinak na kapacitet.

Analitički dobiveni podaci za aerodrom Paris Charles de Gaulle pokazuju uštedu prostora u vrijednosti od 10.48 %, što otprilike odgovara podacima o povećanju protočnosti uzletno-sletnih staza na aerodromu od 11 %, kao što je izvijestila DSNA, pružatelj usluga u zračnom prometu za Francusku.

## LFPG



$$1 - \frac{\text{SUM (RECAT-EU)}}{\text{SUM (WTC)}} = 1 - \frac{94}{105} = 10.48\%$$

Slika 11. Izračun uštede prostora aerodromu Paris Charles de Gaulle

## 6.2. Paris-Le Bourget

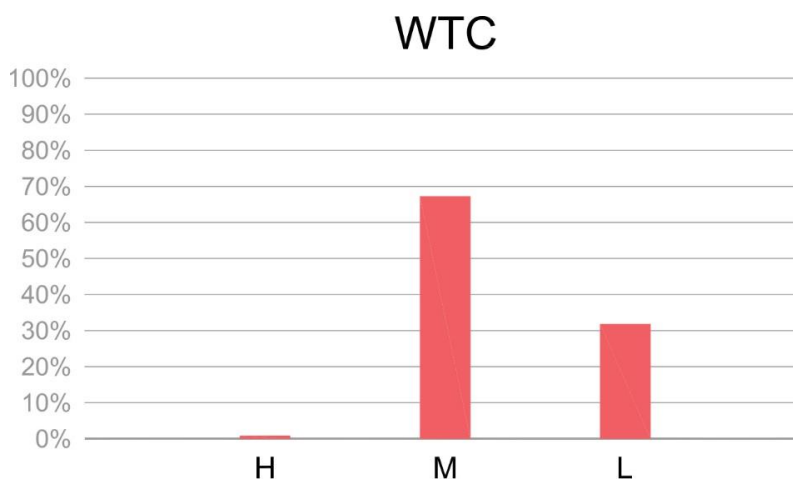
Podaci o prometu na aerodromu Paris-Le Bourget prikazani su u tablici 8. Budući da se radi o aerodromu za generalnu avijaciju, uključujući privatne zrakoplove, profil prometa znatno se razlikuje od Charles de Gaulle-a. Podaci su također preuzeti s NEST-a, za datum 30. 06. 2017. radi lakše usporedbe između dva aerodroma. Radi se o avionima koji su sletjeli na aerodrom u tom promatranom periodu.

U svrhu analize učinkovitosti rekategorizacije, zrakoplovi će biti podijeljeni u odgovarajuće skupine ovisno o pripadnosti određenoj WTC i RECAT-EU kategoriji.

*Tablica 8. Podaci o prometu za LFPG 30.6.2017.*

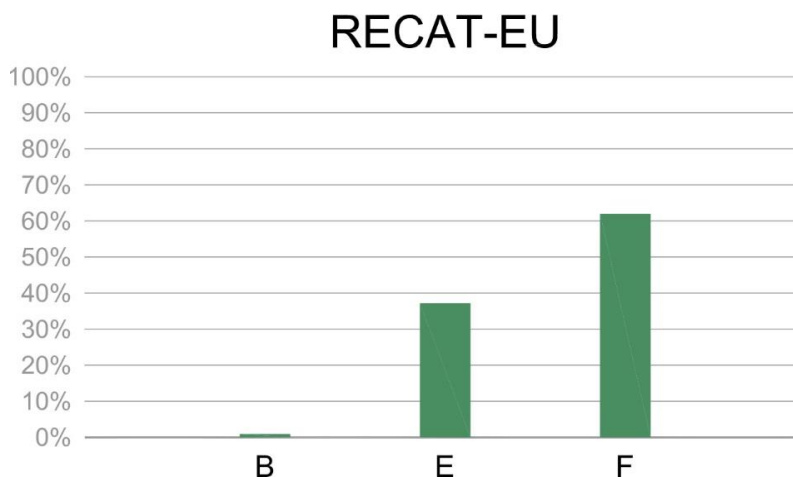
TIP	BROJ	WTC	RECAT-EU		TIP	BROJ	WTC	RECAT-EU
B772	1	H	B		E145	2	M	E
BE20	3	L	F		E35L	4	M	E
BE9L	2	L	F		E50P	2	L	F
C25A	1	L	F		E55P	10	M	F
C25B	4	L	F		F2TH	7	M	E
C25C	3	L	F		F406	1	L	F
C510	7	L	F		F900	3	M	E
C525	3	L	F		FA50	3	M	E
C550	1	L	F		FA7X	5	M	E
C560	2	M	F		GL5T	1	M	E
C56X	14	M	F		GLEK	3	M	E
C680	4	M	F		GLF4	2	M	E
C750	1	M	E		GLF5	5	M	E
CL60	1	M	E		H25B	4	M	F
CL30	2	M	E		P180	2	L	F
CRJ2	2	M	E		PC12	5	L	F
D228	1	L	F		SW3	1	L	F
E135	1	M	E					

Kad se priloženi podaci razvrstaju i izvuče se podatak o zastupljenosti pojedinih kategorija WTC na promatranom aerodromu, dolazi se do informacije ilustrirane Grafikonom 5. Većinu prometa na aerodromu čine zrakoplovi Medium kategorije, sa skoro 70%, dok se ostatak zrakoplova kategorizira kao Light. Heavy promet na ovom aerodromu ima vrlo malen, zanemariv postotak.



*Grafikon 5. Udio WTC kategorija u ukupnom prometu za LFPB 30. 06. 2017.*

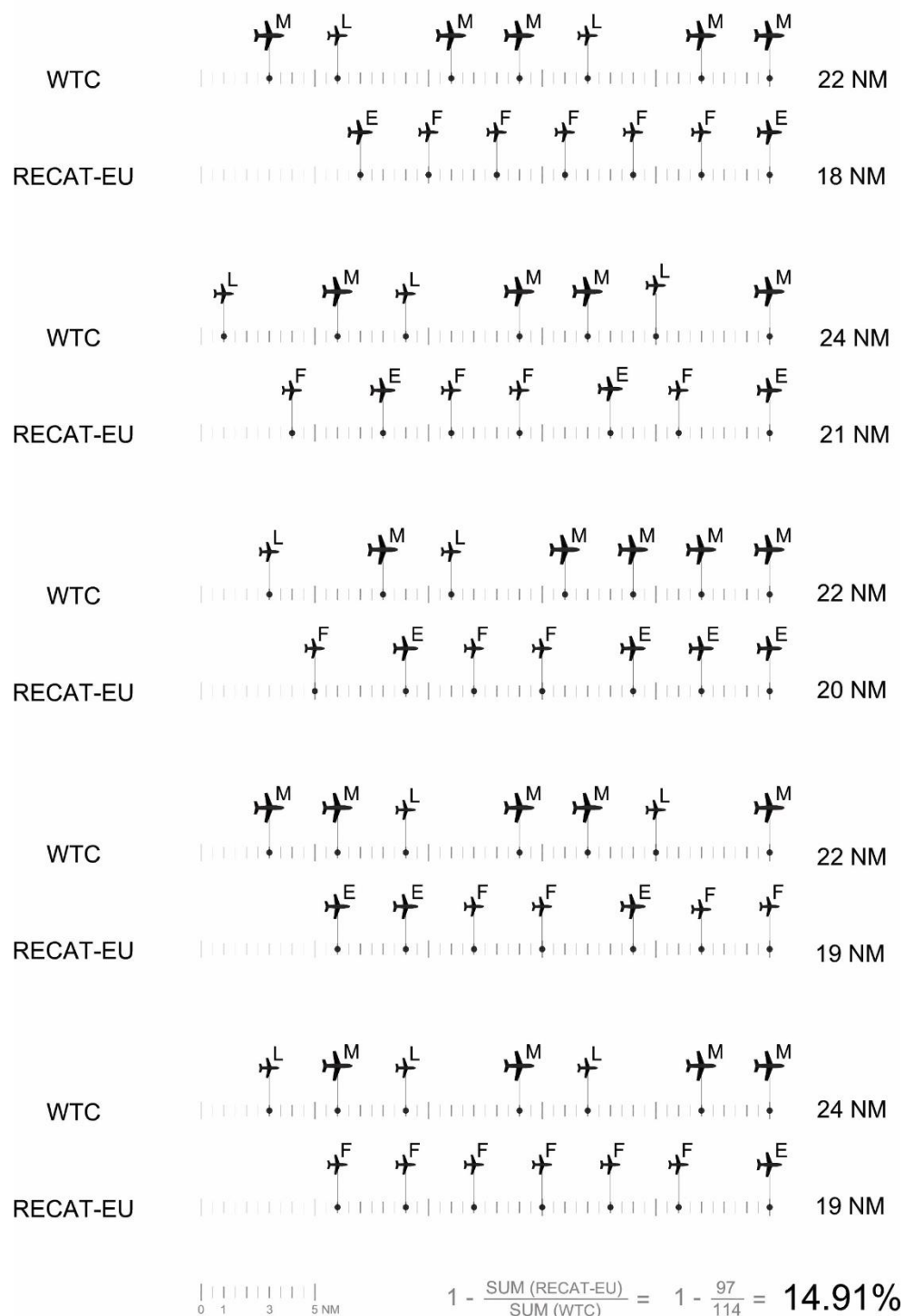
Kad su isti avioni podijeljeni po RECAT-EU kategorizaciji, dolazi se do rezultata prikazanih Grafikonom 6. Avioni su kategorizirani tako da najmanja kategorija, F, dolazi na prvo mjesto u zastupljenosti na aerodromu, što znači da se manji zrakoplovi WTC Medium kategorije vode kao Light zbog rekategorizacije. To pridonosi većem broju Light zrakoplova. Lower Medium sačinjava ostatak prometa, dok je udio Upper Heavy zrakoplova zanemariv.



*Grafikon 6. Udio RECAT-EU kategorija u ukupnom prometu za LFPB 30. 06. 2017.*



## LFPB



Slika 12. Izračun uštede prostora na aerodromu Paris-Le Bourget

Proračun učinka rekategorizacije na aerodromu Paris-Le Bourget pokazuje podjednako dobre rezultate kao proračun za simulirani aerodrom, te bolje nego Paris Charles de Gaulle, iako Heavy, odnosno Upper Heavy kategorija uopće nisu uzete u obzir. Razlog tomu je što zrakoplov F kategorije koji prati zrakoplov E kategorije to može učiniti na manjoj udaljenosti nego kad bi se kategorizirali kao L i M. Drugim riječima, svaki par Lower Medium i Light zrakoplova takav da je Light nakon Lower Mediuma u redu za slijetanje, donosi uštedu prostora. Svi drugi odnosi ostaju nepromijenjeni, što znači da je dominacija Light i Lower Medium zrakoplova na ovom aerodromu ključna za dobre rezultate ispitivanja učinaka rekategorizacije aviona s obzirom na vrtložni trag.

## 7. Procjena učinkovitosti

### 7.1. Postizanje optimalne učinkovitosti u sekvencioniranju

U prethodnim poglavljima prikazani su proračuni učinaka rekategorizacije aviona s obzirom na vrtložni trag za jedan zamišljeni aerodrom s odgovarajućim simuliranim podacima, te dva aerodroma na kojima je implementiran RECAT-EU te su dostupni podaci o njihovom prometu. U sva tri slučaja došlo je do znatne uštede u prostoru koji zrakoplovi zauzimaju prilazeći aerodromu, što se odražava na povećanje kapaciteta te uštedu vremena. Međutim, treba imati na umu da su prikazani nizovi napravljeni tako da se najbolje iskoriste mogućnosti uštede prostora i vremena koje pruža rekategorizacija.

*Tablica 9. Minimalne norme separacije s označenim smanjenim udaljenostima između određenih tipova zrakoplova*

RECAT – EU shema razdvajanja		SUPER	UPPER	LOWER	UPPER	LOWER	LIGHT
		CAT - A	CAT - B	CAT - C	CAT - D	CAT - E	CAT - F
SUPER	CAT - A	3 NM	4 NM	5 NM	5 NM	6 NM	8 NM
UPPER	CAT - B		3 NM	4 NM	4 NM	5 NM	7 NM
LOWER	CAT - C		2.5 NM*	3 NM	3 NM	4 NM	6 NM
UPPER	CAT - D		3 NM	3 NM			5 NM
LOWER	CAT - E						4 NM
LIGHT	CAT - F						3 NM

U tablici 9 ponovno su prikazane minimalne norme separacije koje nalaze RECAT-EU, s tim da su zelenom bojom označeni oni odnosi kategorija koji donose uštedu prostora u usporedbi s podjelom ICAO-a. Crvenom bojom označena su povećanja minimalne separacije zrakoplova u odnosu na podjelu ICAO-a u svrhu povećanja sigurnosti za najmanje tipove zrakoplova. Pri sastavljanju sekvenci korištenih u radu obraćala se pozornost da poredak bude takav da se maksimalno iskoristi mogućnost za poboljšanjem iskorištenosti prostora koju pruža rekategorizacija. Na taj način došlo se do optimalnog redoslijeda slijetanja za promet promatranih karakteristika.

U realnoj situaciji neće uvijek biti moguće sastaviti sekvence takve da se iskoristi svaka mogućnost smanjenja udaljenosti, ponajviše zbog toga što se ne može u velikoj mjeri utjecati na poredak zrakoplova. Teži se tome da avioni što manje vremena provedu u zraku, kako bi se smanjila potrošnja goriva i negativan utjecaj na okoliš. Prema tome, nakon neke određene točke koja služi sabiranju aviona iz različitih smjerova i usmjeravanju uzletno-sletnoj stazi poredak koji je uspostavljen u pravilu ostaje nepromijenjen.

## 7.2. Utjecaj na sigurnost

RECAT-EU dizajniran je tako da smanji udaljenost između zrakoplova gdje je to potrebno zbog protočnosti i povećanja kapaciteta, pritom održavajući prihvatljivu razinu sigurnosti za sve sudionike. Manjim zrakoplovima koji spadaju u kategoriju Light, odnosno F, čak je povećana sigurnost u odnosu na podjelu ICAO-a na način da je povećan razmak koji moraju držati u odnosu na promet većih zrakoplova ispred njih

Različiti kriteriji podjele zrakoplova u kategorije, prvenstveno promijenjene granice mase određenih zrakoplova omogućuju točnije svrstavanje u odgovarajuće kategorije, što rezultira sigurnijom separacijom i boljom integracijom u cjelokupni promet. Kontrolori leta koji sad na raspolaganju imaju 6 kategorija, u odnosu na prethodne 4, mogu biti puno fleksibilniji i efikasniji.

Nadalje, RECAT-EU ne traži instaliranje nove opreme. Kontrolori moraju naučiti nove norme separacije koje postoje. Čak i frazeologija ostaje ista kao što je bila, odnosno zrakoplovi kategorije A, B i C, koji su bili kategorizirani kao H, i dalje se pri prvom javljaju predstavljaju kao Heavy. Jednostavnost ove procedure olakšava siguran prelazak na korištenje rekategorizacije.

## 8. Zaključak

Vrtložni trag aviona, odnosno vrtložna turbulencija koju svaki avion stvara prolaskom kroz zrak, izravna je posljedica stvaranja uzgona na krilima. Prolaskom kroz vrtložni trag zrakoplova ispred sebe, pilot može izgubiti kontrolu nad svojim avionom. Ovisno o razlici u veličinama između ta dva zrakoplova i uvjetima leta, takav događaj može biti manja neugodnost ili ozbiljnije ugrožavanje sigurnosti. Zbog toga je bilo potrebno uvesti način da se zrakoplovi međusobno drže na sigurnoj udaljenosti kako bi se to spriječilo.

Iako je ICAO podijelio avione u tri *Wake Turbulence* kategorije i, nakon uvođenja Airbusa A380 dodao još jednu, porastom prometa došlo je do neusklađenosti između sigurnosti i efikasnosti prometa. Stalan porast prometa potrebno je pratiti i povećanjem kapaciteta. RECAT-EU pruža rješenje problema sve veće zagušenosti aerodroma na način da smanji obaveznu normu separacije između zrakoplova gdje je to moguće bez ugrožavanja sigurnosti.

Analizom u ovom radu došlo se do zaključka da RECAT-EU stvara znatne uštede prostora i vremena na aerodromima gdje se implementira, što se odražava na povećanje kapaciteta i broj mogućih operacija u nekom vremenskom periodu. Dobiveni rezultati slični su onima koje je objavio pružatelj usluga u zračnoj plovidbi za Francusku, DSNA, za aerodrome gdje su implementirali RECAT-EU.

Uvođenje rekategorizacije bilo bi korisno za svaki aerodrom, jer olakšava rad kontrole leta i može postići znatna poboljšanja kapaciteta, neovisno o vrsti prometa koju aerodrom opslužuje, kao što je prikazano primjerom aerodroma Le Bourget koji koristi generalnoj avijaciji. Implementacija je relativno jednostavna, bez potrebe za novom hardverskom podrškom.

## Popis literature

- [1] S. Steiner, Elementi sigurnosti zračnog prometa, Fakultet prometnih znanosti Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb, 1998.
- [2] Z. Rendulić, Aerodinamika, Savezni sekretarijat za narodnu odbranu, Beograd, 1984.
- [3] P. Kesić, Osnove aerodinamike, Fakultet strojarstva i brodogradnje Zagreb, 2003.
- [4] ICAO, Doc 9426-AN/924 Air Traffic Services Planning Manual, International Civil Aviation Organization, 1984.
- [5] ICAO, ICAO Doc 4444 PANS-ATM, International Civil Aviation Organization, 2001.
- [6] SKYbrary, URL: Mitigation of Wake Turbulence Hazard - SKYbrary Aviation Safety, (pristupljeno: ožujak 2018.)
- [7] EUROCONTROL, RECAT-EU Eurocontrol, URL: <http://www.eurocontrol.int/recat-eu>, (pristupljeno: ožujak 2018.)
- [8] EUROCONTROL: Challenges of Growth, EUROCONTROL, 2013.
- [9] URL: <http://www.eurocontrol.int/sites/default/files/content/documents/sesar/recat-eu-released-september-2015.pdf>, (pristupljeno: ožujak 2018.)
- [10] SKYbrary: ICAO Wake Turbulence Category, URL: [https://www.skybrary.aero/index.php/ICAO\\_Wake\\_Turbulence\\_Category](https://www.skybrary.aero/index.php/ICAO_Wake_Turbulence_Category), (pristupljeno: ožujak 2018.)

## Popis ilustracija

Slika 1. Nastajanje cirkulacije oko aeroprofila .....	3
Slika 2. Vezani vrtlog .....	4
Slika 3. Prestrujavanje na vrhovima krila.....	5
Slika 4. Zatvorena vrtložna petlja, [3] .....	5
Slika 5. Formiranje vrtložne površine od izlaznog brida do beskonačnosti, [3] .....	6
Slika 6. HEAVY kategorija - BOEING 767-300 (zeleni) i AIRBUS A340-600 (crveni), [7].....	10
Slika 7. Prekonzervativna separacija B763 -A346, [7] .....	11
Slika 8. Smanjena separacija B763 - A346, [7] .....	11
Slika 9. RECAT - EU kategorizacija zrakoplova; izvor: [8].....	12
Slika 10. Izračun uštede prostora na simuliranom aerodromu .....	18
Slika 11. Izračun uštede prostora aerodromu Paris Charles de Gaulle .....	23
Slika 12. Izračun uštede prostora na aerodromu Paris-Le Bourget .....	26

## Popis tablica

Tablica 1. ICAO kategorizacija zrakoplova.....	8
Tablica 2. RECAT - EU minimalna norma razdvajanja po udaljenosti za prilaz i polijetanje.....	13
Tablica 3. RECAT - EU minimalna norma razdvajanja po vremenu za polijetanje.....	13
Tablica 4. Ukupan promet simuliranog aerodroma.....	14
Tablica 5. Udio kategorija - ICAO.....	15
Tablica 6. Udio kategorija - RECAT-EU .....	16
Tablica 7. Podaci o prometu za LFPG 30.6.2017.....	21
Tablica 8. Podaci o prometu za LFPG 30.6.2017.....	24
Tablica 9. Minimalne norme separacije s označenim smanjenim udaljenostima između određenih tipova zrakoplova .....	28



## Popis grafikona

Grafikon 1. Podjela zrakoplova u kategorije – WTC .....	15
Grafikon 2. Podjela zrakoplova u kategorije - RECAT-EU .....	16
Grafikon 3. Udio ICAO kategorija u ukupnom prometu za LFPG 30.6.2017. ....	21
Grafikon 4. Udio RECAT-EU kategorija u ukupnom prometu za LFPG 30.06.2017. ....	22
Grafikon 5. Udio WTC kategorija u ukupnom prometu za LFPB 30.06.2017. ....	25
Grafikon 6. Udio RECAT-EU kategorija u ukupnom prometu za LFPB 30.06.2017 .....	25



Sveučilište u Zagrebu  
Fakultet prometnih znanosti  
10000 Zagreb  
Vukelićeva 4

### IZJAVA O AKADEMSKOJ ČESTITOSTI I SUGLASNOST

Izjavljujem i svojim potpisom potvrđujem kako je ovaj završni rad  
isključivo rezultat mog vlastitog rada koji se temelji na mojim istraživanjima i oslanja se na  
objavljenu literaturu što pokazuju korištene bilješke i bibliografija.  
Izjavljujem kako nijedan dio rada nije napisan na nedozvoljen način, niti je prepisan iz  
necitiranog rada, te nijedan dio rada ne krši bilo čija autorska prava.  
Izjavljujem također, kako nijedan dio rada nije iskorišten za bilo koji drugi rad u bilo kojoj drugoj  
visokoškolskoj, znanstvenoj ili obrazovnoj ustanovi.  
Svojim potpisom potvrđujem i dajem suglasnost za javnu objavu završnog rada  
pod naslovom **Proračun učinaka rekategorizacije aviona s obzirom na vrtložni trag**  
na internetskim stranicama i repozitoriju Fakulteta prometnih znanosti, Digitalnom akademskom  
repozitoriju (DAR) pri Nacionalnoj i sveučilišnoj knjižnici u Zagrebu.

U Zagrebu, 08-06-18

Student/ica:

Autdoric  
(potpis)